



자기조직화지도를 이용한 서울 폭염사례 분류 연구

백승윤* · 김상욱* · 정명일** · 노준우***† · 손석우****

*서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 석사과정학생, **서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 박사과정학생
 서울대학교 기초과학연구원 선임연구원, *서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 부교수

Classification of Heat Wave Events in Seoul Using Self-Organizing Map

Back, Seung-Yoon*, Kim, Sang-Wook*, Jung, Myung-II**, Roh, Joon-Woo***† and Son, Seok-Woo****

*Master Student, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National Univ., Seoul, Korea
 **Doctor Student, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National Univ., Seoul, Korea
 ***Senior Researcher, The Research Institute of Basic Science, Seoul National Univ., Seoul, Korea
 ****Associate Professor, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National Univ., Seoul, Korea

ABSTRACT

The characteristics of heat wave events in Seoul are analyzed using weather station data from Korea Meteorological Administration (KMA) and European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) ERA-Interim reanalysis data from 1979 to 2016. Heat waves are defined as events in the upper 10th percentile of the daily maximum temperatures. The associated synoptic weather patterns are then classified into six clusters through Self-Organizing Map (SOM) analysis for sea-level pressure anomalies in East Asia. Cluster 1 shows an anti-cyclonic circulation and weak troughs in southeast and west of Korea, respectively. This synoptic pattern leads to southeasterly winds that advect warm and moist air to the Korean Peninsula. Both clusters 2 and 3 are associated with southerly winds formed by an anti-cyclonic circulation over the east of Korea and cyclonic circulation over the west of Korea. Cluster 4 shows a stagnant weather pattern with weak winds and strong insolation. Clusters 5 and 6 are associated with Föhn wind resulting from an anti-cyclonic circulation in the north of the Korean Peninsula. In terms of long-term variations, event frequencies of clusters 4 and 5 show increasing and decreasing trends, respectively. However, other clusters do not show any long-term trends, indicating that the mechanisms that drive heat wave events in Seoul have remained constant over the last four decades.

Key words: Heat wave, Self-Organizing Map, Cluster analysis, Synoptic scale pattern, Physical mechanism

1. 서 론

폭염은 매우 극심한 더위를 뜻하고, 뚜렷한 정의가 없어 연구마다 다르게 정의한다. 이 현상은 위험 기상현상의 하나로 우리나라에서는 가장 많은 인명 피해를 유발하기에 중요한 위험 요소로 다뤄진다. Anderson and Bell (2009)는 폭염 발생일로부터 하루 이내의 사망자 수가 약 3.0% 증가하는 것으로 보고하였다. 일례로 유럽에서는 기록적인 폭염이 나타난 2003년에 약 70,000여명이 사망하였고 (Robine et al., 2008; Schär et al., 2004), 이 중 프랑스에서만 14,802명이 사

망한 것으로 집계되었다. 이 기간동안 프랑스 오세르 지방에서는 기온이 7일 연속으로 40°C를 넘어서는 폭염이 기록되었다 (Fink et al., 2004; Garcia-Herrera et al., 2010). 미국 시카고에서는 1995년 발생한 폭염으로 5일 동안 약 600여명이 사망하였으며 (Kilnenberg, 1999; Semenza et al., 1996), 캘리포니아에서는 2006년 7월 16일에서 25일 사이에 약 140여명이 사망하였다 (Knowlton et al., 2009). 우리나라에서도 1994년에 약 3,400여명이 폭염으로 사망하였다고 보고된 바 있다 (Kysely and Kim, 2009).

† **Corresponding author:** neo0@snu.ac.kr, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea
 Received July 04, 2018 / Revised August 09, 2018 / Accepted August 29, 2018

지구온난화 추세와 함께 미래 기후 시나리오에 따르면 폭염 빈도수와 지속일수, 그리고 폭염의 강도 등이 증가할 것으로 예상되고, 이는 기후변화에 의한 대기 순환의 변화에서 기인하는 것으로 보고있다 (Meehl and Tebaldi, 2004; IPCC, 2013). 만약 현재의 추세와 같이 온실가스가 배출된다면 폭염의 일수가 21세기 후반까지 꾸준히 증가할 것이고, 한반도 또한 증가 현상이 두드러지게 나타날 것으로 예측된다 (Kim et al., 2016). 그뿐만 아니라 최고기온과 최저기온 및 평균기온이 모두 증가하면서 열대야 역시 증가하는 것으로 나타났다 (Hulme et al., 1994; Choi et al., 2007; Ha et al., 2004; Kim et al., 2014; Lee and Kang, 1997). 이에 따라 폭염 피해의 심각성과 대비의 필요성이 부각되어 폭염에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

폭염에 관한 연구는 주로 사례를 분석하는 형태로 이루어졌다 (e.g. Kim et al., 1998; Byun et al., 2006). 한반도의 폭염을 야기하는 대기 구조는 시간 및 공간적 규모가 상당히 다양하다. 대규모 순환 관점에서 보았을 때, 한반도 폭염은 대표적으로 북태평양 고기압의 이상 확장에 의해서 발생한다. 그 예로 1987년은 엘니뇨, 1994년은 태풍 바네사의 영향을 받아 북상한 북태평양 고기압이 한반도 부근에 자리잡으면서 폭염 발생을 야기하였다 (Kim et al., 1998). 또한 2004년 밀양 지역의 이상 고온현상은 태풍에 의한 2차 순환과 함께 티벳 고원의 줄어든 적설면의 영향으로 대륙의 가열이 늘어나면서 강화된 북태평양 고기압으로 고온역의 축이 남하하면서 발생하였다 (Byun et al., 2006). 한반도의 폭염은 대규모 순환의 영향뿐 아니라 썬 현상과 같은 지형효과에 의해서도 나타날 수 있다. 한반도 영동지방에서 불어오는 동풍계열 바람이 썬 현상을 야기하면 태백산맥 서쪽에 위치한 영서지방은 높은 기온과 낮은 상대습도를 가진다 (Lee, 1994). 한편 영서지방에 서풍계열의 바람이 나타나면 이와 비슷한 원리로 영동지방에 고온건조한 대기가 조성된다 (Kim and Hong, 1996).

앞서 언급한 바와 같이 한반도에서 발생하는 폭염사례는 다양한 대기 조건의 영향을 받아 하나의 메커니즘으로는 설명할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 여러가지 군집분석방법 중 하나인 자기조직화지도 (Self-Organizing Map; SOM)를 사용하여 폭염과 연관된 종관 패턴을 보다 세분화하여 살펴보았다. SOM은 비선형적인 과정을 거치는 인공신경망으로써 물리적인 의미가 있고, 불규칙하게 발생하는 대기 순환을 분석하는데 이점을 갖는다 (Barry and Carleton, 2001; Liu and Weisberg, 2005). Chattopadhyay et al. (2008)은 SOM을 이용해 인도 몬순의 강하고 약한 위상을 구분했고, Chu and Ha

(2011)는 SOM을 이용해 동아시아 여름 몬순 지수 내 진동을 구분하였다. 또한 Jun and Choi (2013)는 겨울철에 영향을 미치는 기압 패턴을 분류하며 SOM을 이용한 종관규모 분석에 이점이 있음을 밝혔다.

본 연구에서는 서울 지역의 관측자료를 바탕으로 폭염사례들을 선정하였고, 폭염 발생기작의 일반화된 논의를 위해 합성장 분석을 실시하였다. 또한 SOM을 이용하여 각 폭염사례의 종관 패턴을 객관적으로 분류하여 이를 바탕으로 서울에서 발생한 폭염의 발생기작과 일변동성 및 경향 특성을 유형별로 분석하였다.

2. 자료 및 연구방법

폭염 현상에 대한 정의는 전세계적으로 대부분 절대적인 접근법을 이용하여 이뤄지고 있으나 자세한 정의는 각 지역마다 지역적 특성에 맞게 설정되고 있다. 미국 기상청은 일 최고기온이 90°F (32.2°C) 이상인 날이 3일 이상 지속될 때, 그리스 기상청은 일 최고기온이 38°C 이상인 날이 3일 이상 지속될 때를 폭염으로 정의한다 (Kim and Lee, 2007). 우리나라는 절대적 폭염 정의를 사용하고 있으며 폭염주의보와 경보의 기준은 각각 일 최고기온 33°C 이상이 2일 이상 지속될 때와 35°C 이상인 날이 2일 이상 지속될 때이다. 또 다른 방식의 폭염 정의로는 상대적인 방법으로 해당 지역에서 일 최고기온의 상위 몇 분위에 해당되는 날을 이용한다. 일례로 DeGaetano and Allen (2002)는 전년 일최고기온이 상위 5% 이상인 날이 3일 이상 지속될 때를 폭염으로 정의하여 20세기 미국의 이상고온의 경향성을 분석하였다. 이와 같이 분위수를 이용한 정의는 많은 폭염에 관한 연구에서 일반적으로 이용되는 정의 방법 중 하나로 (e.g. DeGaetano and Allen, 2002; Hajat et al., 2002; Meehl and Tebaldi, 2004; Baldi et al., 2006), 각 지역의 지역적 효과를 반영하여 폭염을 비롯한 고온현상의 발생을 고려할 수 있다는 장점이 있다 (Park et al., 2008). 본 연구에서는 6, 7, 8월 기간에 일 최고기온이 상위 10% 분위에 해당하는 날짜를 선정하여 폭염일 (heat wave day)로 지정하였다. 논문에 보이지는 않았지만 분석기간에 일 최고기온이 상위 5% 분위에 해당하는 날짜로 기준을 강화하여 동일한 분석을 실행한 결과, 폭염을 상위 10% 분위수로 선정하였을 때보다 적은 표본이 있었지만 유사한 결과가 나타나는 것으로 확인되었다.

2.1 자료

서울을 포함한 우리나라 폭염일 선정과 서울지역의 각 군집별 일변화 특성 분석을 위하여 기상청 지상관측소 가운데 총 51개 관측 지점 자료를 사용하였다. 자료의 기간은 1979년부터 2016년의 6, 7, 8월이며 폭염사례는 일 최고기온 자료를 기반으로 산출하였다. 여기서 51개 관측 지점은 지속적으로 관측이 수행된 지점 가운데 우리나라의 공간 분포 거리를 적절하게 고려하여 선택하였다. 또한 폭염 발생시 서울 지역의 각 군집별 일변화 특성 분석을 위해서 서울 관측소에서의 1시간 간격의 기온과 상대습도 자료를 사용하였다.

서울에서 폭염이 발생할 때 이에 기인하는 한반도 주변 중관규모 대기 구조를 분석하기 위하여 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecast; ECMWF)에서 제공하는 ERA-Interim 재분석자료(Dee et al. 2011)로부터, 선정된 폭염사례 시간에 상응하는 대기 변수들을 이용하였다. ERA-Interim 재분석자료의 수평해상도는 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 이고 연직해상도는 37개 층이며 6시간 간격(중관시간)으로 산출되어 있다. 폭염사례일의 합성장 도출 및 중관규모 분석을 위하여 통상 우리나라 일 최고기온이 발생하는 시간과 가장 가까운 06UTC (15KST) 시간 자료를 해당 사례일에 상응하는 자료로 사용하였다.

2.2 자기조직화지도 기법

자기조직화지도(SOM)는 자율학습을 바탕으로 하는 인공 신경망의 일종으로 학습을 통해 군집을 도출해 낼 수 있는 군집분석 방법 중 하나이다(Chu and Ha, 2012; Um, 2003). SOM은 사전적인 관계와 상관없이 오로지 입력된 패턴만을 인식하여 분류를 하는 기술로 데이터의 차원을 줄이는 기술로도 알려져 있으며, 간단히 말해서 여러 장의 지도를 N개의 노드로 구성된 지도로 축소시키는 과정이다. 이 방법은 대기 순환 분석에서 유용하게 사용되고 있으며 분류된 패턴은 물리적으로도 의미를 지닌다(Liu and Weisberg, 2005). Johnson et al. (2008)은 SOM을 이용하여 북대서양진동과 연관된 북반구의 원격상관 패턴을 연속적으로 살펴보았다.

SOM은 다차원으로 구성된 데이터를 입력받아 사용자가 설정한 N개의 노드수 만큼의 차원의 결과를 도출한다. 여기서 노드란 입력벡터들 중에서 서로 유사성이 큰 벡터들끼리 모이는 영역을 의미하고, 노드수 만큼 생긴 N개의 벡터 모임에서 각 노드를 대표하는 벡터를 참조벡터라 한다. 서로 이웃한 노드일수록 참조벡터의 유사성이 크게 나타난다. 입력된 벡터는 경쟁층에 존재하는 N개의 노드에 대해서 각각 유클

리드 거리를 계산할 수 있으며 최종적으로 이 거리가 최소로 측정된 노드에 배정된다. 입력벡터들이 각 노드에 배열될 때마다 해당 노드와 이웃 노드는 일련의 조정과정을 거쳐 업데이트되며 마지막 입력벡터가 노드에 배열될 때까지 위 과정이 반복된다. 일반적으로 SOM은 안정적인 학습을 위해서 마지막 입력벡터가 노드에 배열된 후에도 마지막 입력벡터를 첫 번째 입력벡터로 재설정하고, 학습률을 수정하여 위의 과정을 반복한다. 설정한 최대 반복횟수만큼 반복했을 때, SOM은 입력한 자료를 N개의 군집으로 나누게 된다(Chu and Ha, 2012).

본 연구에서는 폭염 발생에 기인하는 중관규모 대기 구조의 패턴을 분류하기 위해 군집분석 중 하나인 SOM을 이용하였고, 노드의 수와 노드의 배열 및 분석 지역에 대해서 민감도 실험을 실시한 후, 가장 적합한 결과를 기반으로 분석을 수행하였다. 노드 수에 따른 민감도 실험 결과, 모든 노드에서 물리적으로 의미있는 결과가 나타났지만, 6개의 노드일 때 가장 물리적 기작이 잘 나타났다. 또한 동아시아 지역을 분석지역으로 한정할 때, 분석 영역에 관계없이 유사한 결과가 나타났다. 최종적으로 SOM의 배열은 2×3 으로 설정하여 총 6개의 군집으로 분류하였다. 중관규모 패턴들의 분석을 위해 입력자료로는 동아시아 지역(20° - 50° N, 100° - 150° E)의 해면기압 편차(Anomaly)를 사용하였다.

3. 결과

3.1 폭염일 선정과 합성장 분석

상대적인 폭염일 선정 방법(상위 10%)으로 지정한 서울 폭염사례의 평균 일 최고기온은 32.5°C 로 나타났다. 이는 기상청 폭염주의보 발령기준(33°C)과 크게 차이가 나지 않았다. 지정한 기준에 의해 정의된 상위 분위 사례에 대하여 폭염사례 시작일을 폭염발생일(heat wave event)로 정의하였다. 본 연구의 분석기간인 1979-2016년 6, 7, 8월에 해당하는 서울 지역 전체 폭염일수는 총 342일이고, 폭염사례수는 114회로 나타났다. Fig. 1은 전국 51개 지점에서 관측된 평균 폭염일수(파란색)와 서울 폭염일수(빨간색)의 연도에 따른 경향성을 나타낸다. 서울의 폭염일수는 1994년에 30일, 2016년에 23일을 기록하였다. 전국 51개 관측지점에서의 평균 폭염일수 변화는 1994년에 약 30일, 2016년에 약 23일에 해당하는 폭염일수를 기록하는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 지속일수에 따른 전국 51개 지점에서 관측된 평균 폭염사례수(파란색)와 서울 폭염사례수(빨간색)이다. 폭

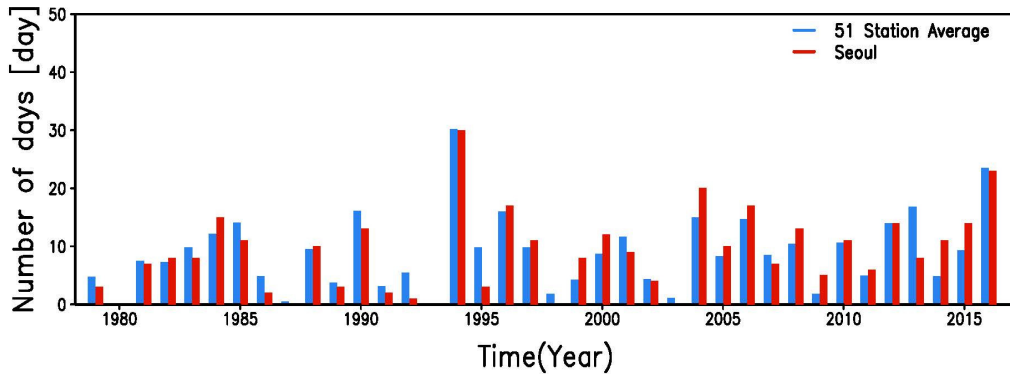


Fig. 1. The number of heat wave days averaged over 51 KMA stations (blue) and those in Seoul (red).

염의 지속일수가 1일인 폭염사례수가 전반적으로 가장 많이 나타나고, 지속일수가 길수록 폭염사례수는 줄어든다. 지속일수가 길수록 일반적으로 폭염사례수가 적어지는데 비해, 가장 극심한 폭염이었던 1994년 서울에서는 폭염의 지속일수가 1일인 사례가 존재하지 않는 반면 (Fig. 2a), 4일에서 5일 사이인 사례가 가장 많았다 (Fig. 2c). 또한 같은 해에 7일 이상 폭염일이 지속되는 사례가 한번 발생하였는데, 무려 22일동안 폭염이 지속되었다. 또한 각 월별 폭염 발생일수는 6월에 18회, 7월에 39회, 8월에 57회로 8월이 가장 많이 나타났다.

114개 폭염사례에 대하여, 폭염 발생과 연관된 중관규모의 대기 구조의 특성을 보기 위해, 폭염 발생일의 해면기압과 1000 hPa 수평 바람장을 분석하였다. Fig. 3a는 1979-2016년 여름철의 해면기압과 1000 hPa 수평 바람장 기후값으로, 우리나라 남동쪽에는 북태평양 고기압이 있고, 북서쪽과 남서쪽에는 저기압이 위치한 여름의 전형적인 기압 배치를 나타냈다. 여름철 한반도는 이러한 기압계 배치에 의해 남풍 및 남서풍 계열의 바람 영향을 받는다. Fig. 3b는 기후값에 대한 폭염발생일의 해면기압과 1000 hPa 수평 바람장 편차를 나타낸다. 한반도 북서쪽 지역에 시계방향 회전을 동반하는 고기압 편차가 위치하고, 동중국해 부근과 캄차카 반도 부근에는 반시계방향 회전의 수평 바람장 편차를 동반한 저기압 편차가 나타났으며 이는 통계적으로도 유의한 편차이다. 반면 통계적으로 유의하지는 않지만 일본 동쪽에 약한 고기압 편차가 나타났다. 한반도 북서쪽에 중심을 두고 있는 고기압 편차는 약화된 저기압 세력이 한반도에 영향을 줄 때 폭염이 발생할 수 있음을, 동중국해 저기압 편차는 우리나라 쪽으로 남풍 계열의 온난이류를 강화하여 폭염이 발생할 수 있음을 보여준다. 한반도에서의 바람 편차는 매우 작게 나타났으므로, 중관 기후장에서 나타난 남풍 및 남서풍 계열에 영향을 받는 것

으로 분석되었다.

3.2 자기조직화지도 (SOM) 군집분석

한반도 기상현상은 다양한 기단과 기압계의 영향을 받아 각 현상에 해당하는 기작들이 매우 복잡하며 복합적으로 나타나기 때문에 그 진단과 해석이 어렵다. 이와 같이 복잡한 발생기작을 효율적으로 분석하기 위하여 유형을 분류하여 각 유형별로 분석을 수행하는 방법이 사용된다 (e.g. Lee and Park, 1999; Moon, 1990; Cho et al., 2018). 본 연구에서는 서울 폭염사례일에 상응하는 중관규모 대기 구조로부터 폭염의 발생기작의 이해를 높이기 위해 SOM 군집분석을 실시하였다. 우리나라 폭염은 앞서 선행연구에서 언급된 것과 같이 고기압의 영향을 받거나 따뜻한 기류의 형성으로 발생하므로, SOM의 분석 영역을 설정할 때 이러한 기단과 기압계를 충분히 포함하는 범위 (20°-50°N, 100°-150°E)로 설정하였다. 대기 변수로는 해면기압 편차를 기반으로 하였고, 6가지 군집 (2×3 노드)으로 나눌 수 있도록 SOM 군집분석을 실시하였다. Table 1은 군집분석 결과 각 군집에 해당하는 폭염사례에 해당하는 날짜를 나타낸다. 전체 114회의 폭염사례 중 각 군집 (Cluster)별 폭염사례수 (전체 사례수에 대한 비율)는 군집 1부터 6까지 순서대로, 20회 (17.54%), 28회 (24.56%), 16회 (14.04%), 23회 (20.18%), 13회 (11.40%), 14회 (12.28%)로 나타났다. 각 군집 별 사례 수에 있어서 군집 2가 총 28회로 가장 많은 폭염사례의 발생 횟수를 보였다.

각 군집에 해당하는 폭염발생일의 해면기압 편차와 1000 hPa 수평 바람 편차는 Fig. 4에 합성장으로 나타내었다. 보다 상층의 중관패턴 또한 분석하기 위해 500 hPa와 200 hPa 지위고도 편차와 수평 바람 편차 합성장을 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 나타냈다. 군집 1은 한반도 남동쪽 북태평양 부근에 고기

압 편차가 시계방향 수평 바람장 편차를 동반하여 분포하고 있고, 오히려 부근에 저기압 편차가 반시계방향 수평 바람과 동반하여 분포한다. 한반도 남동쪽 고기압 편차와 한반도 남서쪽 기압골 편차의 영향으로 한반도는 남서풍 계열의 수평 바람 편차가 형성된다 (Fig. 4a). 500 hPa 등압면의 지위 고도와 수평 바람 편차를 살펴보면 한반도 남동쪽에는 고기

압성 회전이 나타나고, 한반도 서쪽과 산둥 반도를 중심으로는 저기압 편차가 형성되어 있으며 각각은 수평 바람 편차와 물리적으로 잘 상응하고 있다 (Fig. 5a). 한반도 남동쪽에 위치한 고기압 편차는 하층부터 상층까지 연속적으로 깊게 분포하여 키가 큰 고기압, 즉 북태평양 고기압 세력임을 알 수 있다. 이와 맞물려 한반도 서쪽에는 저기압 세력이 위치하여

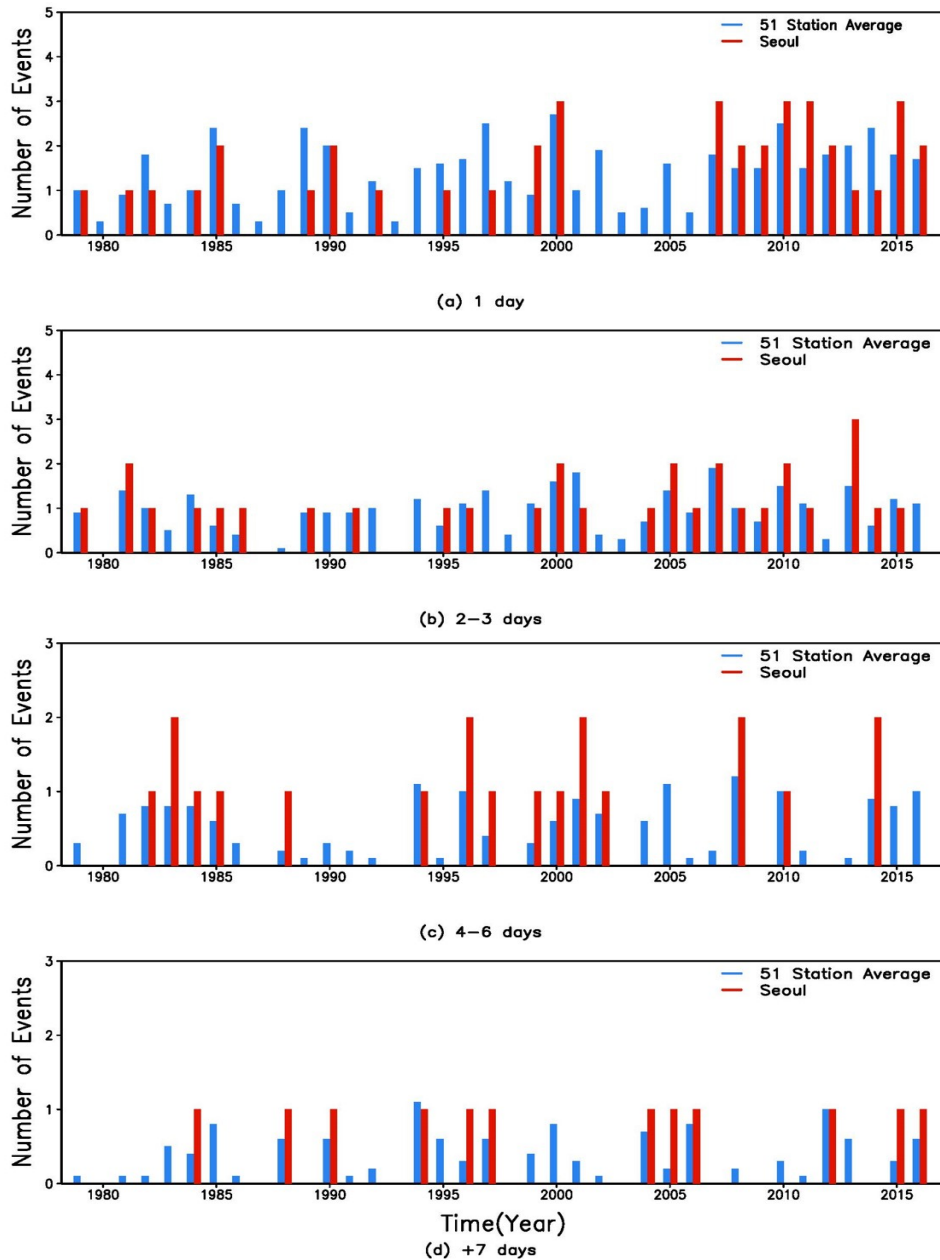


Fig. 2. The number of heat wave events with a duration of (a) 1 day, (b) 2-3 days, (c) 4-6 days, and (d) 7 days and longer. The values averaged over 51 KMA stations are shown in blue, whereas those in Seoul are shown in red.

남서풍 바람을 강화시키는 대기 구조가 형성되어 있음을 알 수 있다. 이는 남서풍에 의해 한반도 남쪽의 온난습윤 공기가 유입되는 유형을 보여준다.

군집 2와 군집 3의 해면기압 편차는 세력의 차이는 있으나 한반도 동쪽에 양의 편차, 서쪽에 음의 편차 구조로 유사한 유형으로 나타났다. 군집 2는 서쪽에 음의 편차가, 군집 3은 동쪽에 양의 편차가 상대적으로 더 강하며, 두 군집 모두 기압계 분포에 의해 고기압 세력 가장자리를 타고 남풍 계열의 수평 바람 편차가 형성되어 있음을 볼 수 있다 (Fig. 4b-c). 500 hPa 지위고도 편차도 한반도 동쪽에 넓은 영역으로 시계 방향 수평 바람 편차와 동반하여 양의 편차 값을 보인다 (Fig. 5b-c). 군집 3에서는 상층에 위치한 고기압성 회전이 해면기압에서 보다 더 강화되어 남동풍의 바람이 나타났다. 이처럼 두 군집의 기압배치는 해면기압뿐 아니라 500 hPa 등압면에서도 유사성을 가지나 양과 음의 편차가 가지는 세력이 다소 다르게 나타난다. 군집 2는 일본 남쪽에 중심을 둔 약한 고기압성 회전이 나타나고, 군집 3는 일본 북부에 중심을 둔, 상대적으로 강한 고기압성 회전이 나타났다. 이러한 양의 지위고도 편차 위치와 세력에 의해, 군집 2의 경우 한반도 남동쪽의 고기압성 순환에 의하여 한반도 부근에 남풍 계열의 편차가 유도된다. 반면, 군집 3은 남동풍 계열의 편차가 형성되었다. 결론적으로 두 군집에서는 고기압성 회전에 의한 남풍기류 혹은 남동기류가 나타나고, 남쪽에 위치한 따뜻한 공기가 유입되면서 폭염이 나타나는 유형을 보였다.

총 23개의 폭염발생일이 포함된 군집 4에서는 한반도 동

쪽에 음의 해면기압 편차를 보였다 (Fig. 4d). 수평 바람의 편차는 해면기압 편차를 따라 형성되기 때문에 한반도 북서쪽에는 북풍 계열의 바람 편차가 존재한다. 그러나, 여름철 수평바람장의 기후값은 남풍계열의 바람이 불기 때문에 본 논문에 보이지는 않았지만 실제 수평바람장은 약 1 m/s 로 약한 바람이 부는 것으로 나타났다. 또한 해면기압 편차를 기후값과 비교하면, 군집 4는 음의 편차를 갖지만 주변 지역에 비해 상대적으로 높은 해면기압 값을 가지므로 이는 오랜 기간 정체하고 있는 이동성 고기압으로 보인다.

군집 5와 군집 6은 한반도 북쪽에 양의 해면기압 편차가 위치하는 대기 구조를 보였다 (Fig. 4e-f). 군집 5에서는 한반도 남쪽에 강한 음의 해면기압 편차가 위치하여 저기압성 회전을 보이고 이와 맞물려 한반도에는 북동풍 계열의 편차가 형성되는 것을 확인하였다. 반면, 군집 6에서는 바이칼 호 (Lake Baikal) 부근부터 오호츠크해 부근까지 폭넓게 강한 양의 해면기압 편차가 위치하여 한반도에 북동풍 계열의 편차가 형성되어 있다. 군집 5와 6의 500 hPa 지위고도 편차는 하층에 위치한 해면기압 편차와 상응하여 비슷한 위치에 같은 부호로 존재한다 (Fig. 5e-f). 각 군집의 사례들을 확인해본 결과, 군집 5와 군집 6는 각각 3번과 4번의 태풍의 간접 영향을 받는 사례가 있었고, 그 외, 20개 사례에서 북고남저의 기압 유형이 나타났다. 이러한 한반도 북쪽의 고기압성 회전과 한반도 남쪽의 저기압성 회전에 의해 동풍계열의 바람이 유도되는 대기 구조가 형성되었고, 동풍은 한반도 동부의 지형적 영향 (태백산맥)으로 편 현상 (풍하측에 고온건조한 공기가

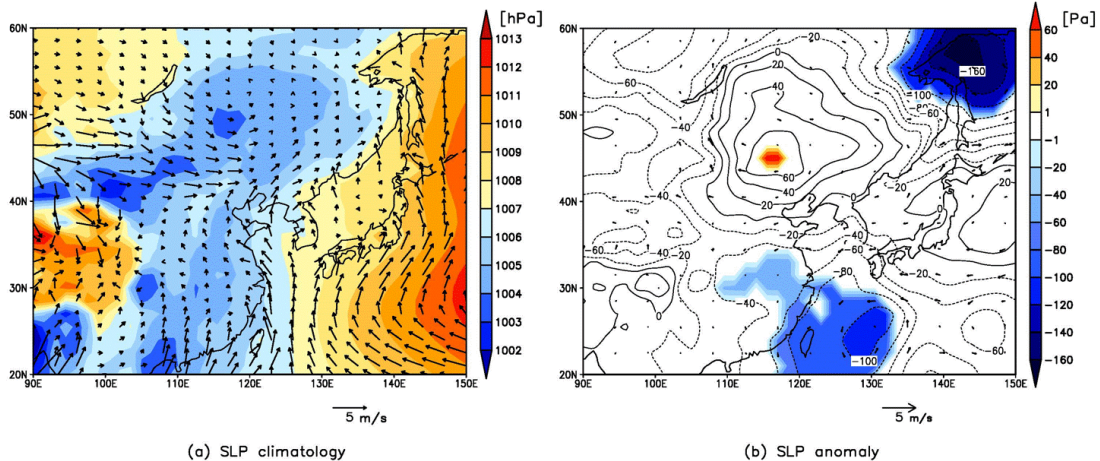


Fig. 3. (a) The climatology of sea level pressure (shading) and 1000-hPa horizontal wind (vector) in June-August and (b) anomalies of sea level pressure (contour) and wind (vector) during heat wave events. In (b), shading denotes the values that are statistically significant at the 95% confidence level according to a Student's t-test.

Table 1. The List of the dates (YYYY.MM.DD; YYYY: year, MM: month, DD: day) for each cluster. Blankets indicates the number of heat wave events and percentage.

	Cluster 1 (20, 17.54%)	Cluster 2 (28, 24.56%)	Cluster 3 (16, 14.04%)	Cluster 4 (23, 20.18%)	Cluster 5 (13, 11.40%)	Cluster 6 (14, 12.28%)
Date of heat wave events day	1982.07.08	1981.07.25	1983.06.19	1979.08.13	1982.07.14	1985.07.26
	1984.07.30	1981.07.30	1983.08.03	1984.06.13	1983.08.13	1994.06.14
	1984.08.18	1981.08.14	1985.08.18	1985.07.22	1984.07.15	1996.08.19
	1985.08.12	1982.08.08	1994.08.19	1989.08.04	1984.07.27	1997.08.13
	1988.06.26	1984.08.09	1995.07.23	1990.07.29	1986.08.01	1999.06.28
	1988.08.01	1985.08.08	1996.06.01	1991.08.20	1989.07.31	2000.06.28
	1992.08.29	1990.08.12	1996.08.14	1999.07.14	1991.08.14	2001.07.26
	1995.08.14	1994.08.05	1997.08.06	2000.07.02	1994.07.12	2001.08.02
	1996.08.09	1996.07.18	2000.08.02	2001.06.07	1997.07.22	2004.07.23
	1997.08.01	1996.07.31	2009.08.09	2001.08.16	2000.06.18	2005.08.16
	1997.08.18	1997.06.15	2010.08.19	2006.08.08	2000.08.30	2012.06.19
	1999.07.20	1999.08.06	2011.07.18	2007.06.18	2007.08.23	2012.07.26
	1999.07.26	2000.07.27	2012.08.27	2008.07.08	2014.07.30	2015.06.10
	2005.07.22	2000.08.11	2014.07.07	2008.08.06		2015.07.30
	2010.06.10	2001.06.10	2015.07.10	2009.08.14		
	2010.08.05	2002.07.25	2016.07.20	2012.06.24		
	2011.08.05	2004.07.28		2013.08.08		
	2011.08.31	2004.08.09		2013.08.11		
	2015.07.15	2005.08.05		2013.08.21		
	2015.08.05	2006.08.03		2014.07.25		
		2007.08.11		2015.08.12		
		2010.08.09		2016.07.30		
		2011.06.19		2016.08.03		
		2013.06.29				
		2013.08.03				
		2014.07.20				
		2015.08.17				
		2016.07.09				

이송되는 기작)이 나타나면서 서울 지역에 폭염을 유발하였다.

200 hPa 등압면의 지위고도와 수평바람장 편차를 분석한 결과, 모든 군집에서 한반도 북부에 양의 지위고도 편차가 나타나는 것으로 확인되었다. 군집 1, 4, 5, 6에서는 중국 북동부에 고기압성 회전이 위치하는데 이는 티베트 고기압으로 보인다 (Fig. 6a, 6d-f). 또한 군집 2와 군집 3은 북태평양 고기압의 연직 구조가 나타나는 것으로 보인다 (Fig. 6b-c).

3.3 자기조직화지도 (SOM) 군집분석의 일변동 및 경향 특성

폭염발생일을 이용한 SOM 군집분석 결과, 각 군집별로 중관규모 대기 구조 유형을 체계적으로 분류할 수 있었다. 이는 전체 폭염사례들을 하나의 합성장으로 분석하였을 때 나

타난 폭염 발생기작보다 더 효과적인 해석이 가능하였다. 따라서 분류된 군집을 토대로, 서울지역의 기상청 지상 관측소 관측 자료를 이용하여 우리나라 폭염의 일변동 특성과 경향성을 조사하였다. Fig. 7은 폭염발생사례에 대한 각 군집별 서울 기온 일변동성이다. 우리나라 기온의 경우, 강수 현상 등이 없는 보편적 상황에서는 태양 복사의 영향을 받아 Sine 파형 곡선 유형을 나타낸다. 연구에 선정된 전체 폭염발생사례의 평균 일변동도 이러한 유형을 보인다 (Fig. 7a). 각 군집별 기온 일 변동을 보면 21시부터 6시까지 각 군집별 기온 변동 폭이 큰 반면, 14시부터 18시까지의 낮 시간에는 기온 변동 폭이 상대적으로 작게 나타났고, 15시나 16시경에 일 최고기온을 기록하는 것으로 나타났다 (Fig. 7b). 각 유형별로 평균된 일변화를 보면, 군집 1은 16시에 일 최고기온을 기록했고, 군집 2-6은 15시에 일 최고기온을 기록했다. 군집 1은

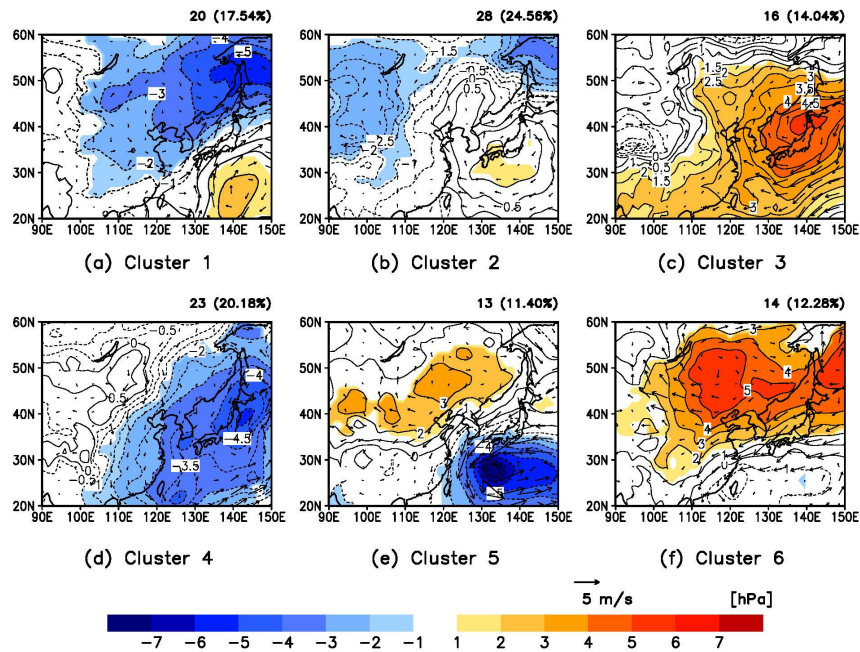


Fig. 4. The sea-level pressure anomalies (contour) and 1000-hPa wind anomalies (vector) for (a) cluster 1 to (f) cluster 6. Shading denotes the values that show statistical significance at the 95% confidence level according to a Student's t-test.

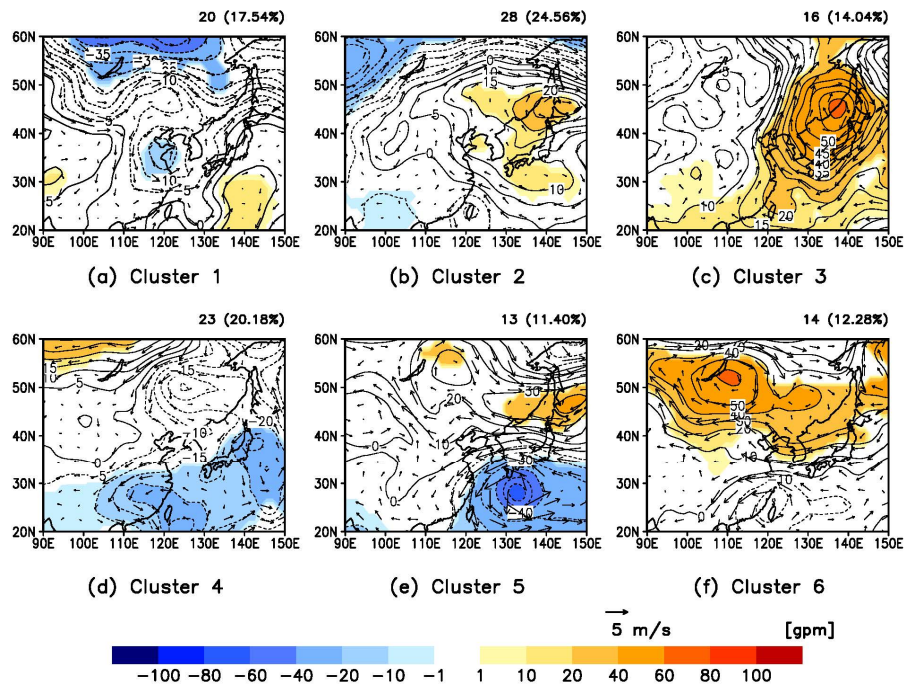


Fig. 5. The 500-hPa geopotential height anomalies (contour) and wind anomalies (vector) for (a) cluster 1 to (f) cluster 6. Shading denotes the values that show statistical significance at the 95% confidence level according to a Student's t-test.

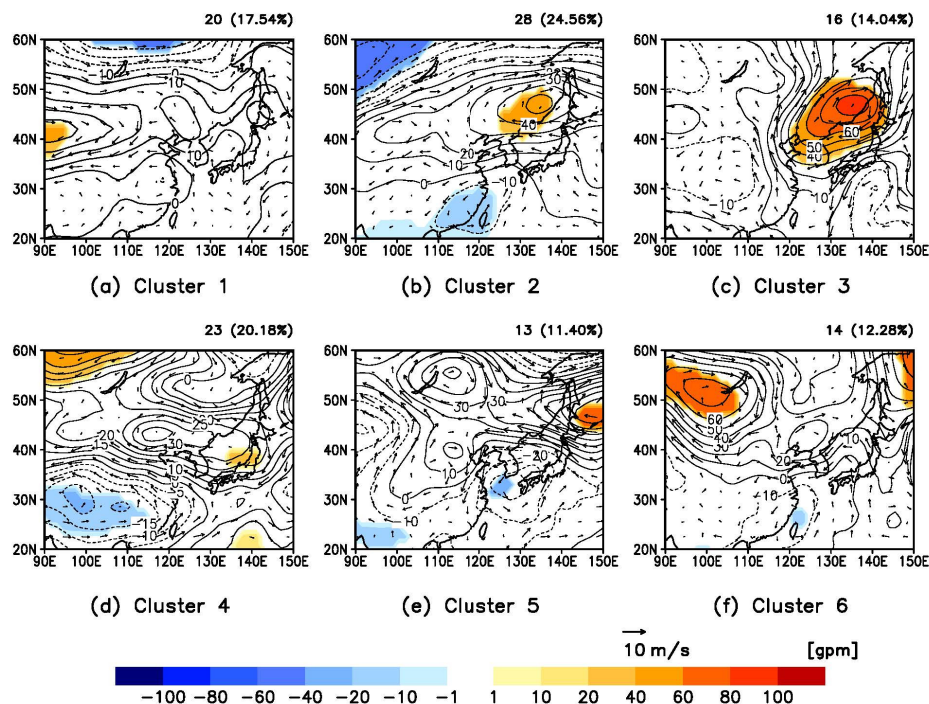


Fig. 6. The 200-hPa geopotential height anomalies (contour) and wind anomalies (vector) for (a) cluster 1 to (f) cluster 6. Shading denotes the values that show statistical significance at the 95% confidence level according to a Student's t-test.

다른 유형에 비해서 일 최고기온이 높을 뿐만 아니라 전 시간을 비교해보았을 때에도 전반적으로 높은 기온이 나타났다 (Fig. 7b). 이는 군집 1의 발생기작이 남서기류의 유입에 의한 것인데, 이로 인해 서울은 일중 높은 기온이 지속적으로 기록 되는 경향이 있는 것으로 보인다. 군집 2는 0시부터 10시까지 군집 1 다음으로 높은 기온을 유지하다가 이후 평균 일변동권에서 변동하는 경향을 보였다. 군집 3은 12시에 가장 빠른 기온 상승을 보였고 19시 이후에도 기온이 유지되는 경향을 보였다. 이는 남풍 계열의 바람이 폭염을 유발하는 기작의 영향으로 보인다. 군집 4는 기온의 일변동이 대부분 평균 일변동의 권역 내에서 형성되었다. 이는 타 군집들이 일사 영향과 함께 더운 공기가 유입되는 발생기작에 비해, 군집 4는 상대적으로 일사 영향에 더 의존하는 것으로 추정된다. 군집 5와 군집 6은 기온의 일변동폭이 가장 두드러졌다. 특히 군집 6은 총 6개의 군집 중 가장 낮은 최저기온을 기록한 후, 큰 폭의 일변동을 나타내며 최고기온은 다른 유형들의 최고기온과 유사한 값을 보였다. 두 군집은 동풍기류가 유입되는 발생기작으로 해석이 되는데, 서울에 건조한 공기가 형성되어 기온의 변동폭이 크게 나타난 것이다. 기상관측소에서 측정된 상대습도 값을 이용하여 각 군집별 일 변동을 산출해보면 군

집 5와 군집 6은 비교적 낮은 상대습도를 모의하는 것을 알 수 있다 (Fig. 8). 고기압성 순환에 의해 남동풍 계열이 우세한 군집 3에서도 이러한 유사성이 나타난다. 같은 고기압성 순환에 의한 폭염 유발 유형이지만 남풍이 우세한 군집 2에서는 전반적으로 높은 기온을 유지하는 것으로 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 남쪽에서 따뜻한 공기가 유입되면서 나타나는 것으로 보인다. 이처럼, 폭염사례들의 기온 평균 일변동에 대한 각 군집별 편차를 통해 군집 1, 군집 5, 군집 6은 다른 군집들에 비하여 상대적으로 더 뚜렷한 일변동 특성 차이를 보여줬다.

Fig. 8은 폭염발생일의 상대습도를 나타낸 것으로, 검정색 실선은 6개 군집의 평균 상대습도의 일변화를, 회색 영역은 6개 군집의 표준편차를 나타내고 각 선들은 각 군집의 상대습도 일변화를 나타낸다. 각 사례별 일 변화는 공통적으로 14시에서 16시경에 일 최저 상대습도를 기록하는 것으로 나타났다. 이러한 현상이 두드러지게 나타나는 원인은 기온이 증가하면서 포화수증기압이 증가하고, 그에 따라 상대습도는 낮아지기 때문이다. 앞서 언급한 것처럼 군집 5와 군집 6은 각각 14시와 15시에 가장 낮은 최저 상대습도를 기록했는데, 이는 건조한 공기가 서울 지역에 유입되어 매우 낮은 상대습

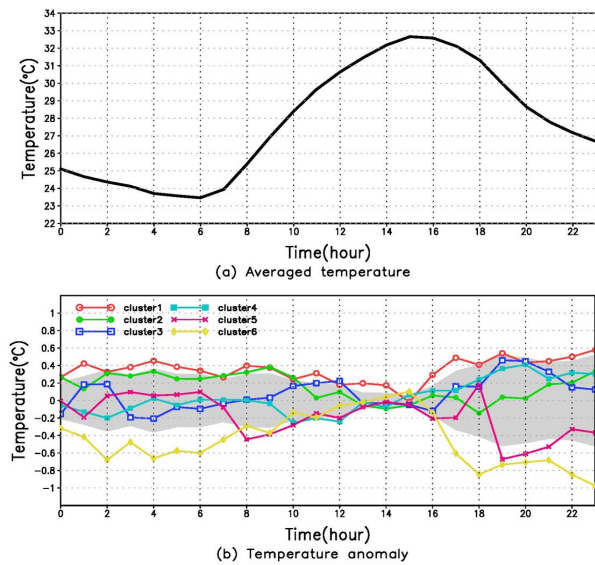


Fig. 7. Diurnal variation of (a) the averaged temperature of six clusters and (b) the departures from the mean temperature for each cluster (colored line) and 1 standard deviation (gray shading).

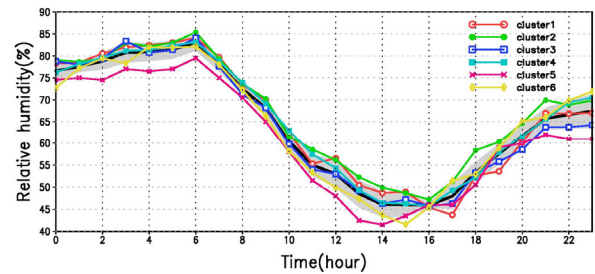


Fig. 8. Diurnal variations of relative humidity for six clusters (colored lines), six cluster averaged relative humidity (black line) and 1 standard deviation (gray shading).

도를 가지는 것으로 보인다. 또한 군집 3 역시 비교적 낮은 최저 상대습도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 반면 군집 1은 17시를 제외하고 전반적으로 높은 상대습도를 가지는 것을 확인할 수 있고, 이는 일반적으로 가장 낮은 상대습도가 기록되는 14시에서 15시 사이에 더 두드러지게 나타난다. 이는 남서풍을 통해 동중국해에서 덥고 습한 공기가 유입되어 높은 상대습도가 나타나는 것으로 보인다. 또한 고기압성 순환 중 남풍계열의 바람이 강한 군집 2 역시 전반적으로 높은 상대습도를 나타냈고, 최저 상대습도 또한 다른 유형들에 비해 높게 나타났다.

각 군집들의 경향성을 분석하기 위해서 5년 간격의 폭염사

례수를 살펴보았다. 분석기간은 1979년부터 1981년을 제외한 1982년부터 2016년까지로, 1979년부터 1981년 기간동안 폭염사례수가 4회로 적게 나타나 임의로 지정한 5년 간격 분석에서 제외하였다. 그 결과, 군집 4와 군집 5에서는 두드러진 증감이 있음을 확인할 수 있었다 (Fig. 9a). 군집 4는 폭염사례수가 시간에 따라 증가하여, 1982년에서 1986년 사이에 군집 4와 같은 발생기작에 의한 폭염이 2회 발생한 반면, 2012년과 2016년 사이에는 8번 발생하였다 (Fig. 9b). 반면 군집 5는 폭염사례수가 시간에 따라 감소하는 것으로 나타났고, 2012년과 2016년 사이에는 1번 발생한 반면 1982년과 1986년 사이에는 5회 발생하였다 (Fig. 9c). 이는 3년 간격의 폭염사례수와 7년 간격의 폭염사례수에서도 유사한 결과가 나타났다. 이러한 증감은 각 폭염 발생기작과 관련된 한반도 주변 대기 구조의 변화가 뚜렷이 있었음을 추정할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 서울에서 발생한 폭염의 특성을 분석하기 위하여 서울 및 전국 지점의 폭염사례일을 비교하였고, 폭염 발생시 그에 상응하는 종관규모 대기 구조의 유형별 발생기작과 특성에 대해 조사하였다. 연구를 위해 1979년부터 2016년의 여름철 서울 지역에서 일 최고 기온 상위 10% 분위에 해당하는 날을 폭염일로 지정하고, 연속된 폭염일을 하나의 폭염사례로, 폭염사례의 첫 날을 폭염발생일로 정의하였다. 그 결과 서울의 폭염은 32.5°C 이상의 기온으로 나타났고, 총 342일의 폭염일과 114회의 폭염사례가 선정되었다. 선정된 폭염사례와 연관된 종관규모 대기 구조를 살펴보기 위해 합성장 분석을 실시한 결과, 한반도 북쪽과 남쪽에 각각 양, 음의海面기압 편차가 위치하는 대기 구조가 나타났다. 그러나 한반도는 다양한 기단과 기압계의 영향을 받으므로 폭염의 종관규모 발생기작에 대한 이해를 높이기 위해 SOM 군집분석을 도입하였다. 이를 통해 폭염 발생에 관련된 종관규모 대기 구조를 다음과 같이 총 6개의 군집으로 분류하였다.

군집 1의 폭염은 남서기류 유입에 의해 발생한 유형으로, 한반도 남동쪽에 위치한 고기압과 서쪽의 저기압에 의해 동중국해로부터 따뜻하고 습한 공기가 유입되는 기작이다 (Fig. 4a). 이에 따라, 기온의 일변동성과 상대습도 모두 다른 유형들에 비해서 높게 나타났다 (Fig. 7b, 8).

반면 군집 2와 군집 3은 한반도 동쪽에는 고기압성 순환, 서쪽에는 저기압성 순환이 존재하여 남풍 기류가 유입되는 유형이다. 두 군집은 유사한 대기 구조를 보이지만 군집 2는

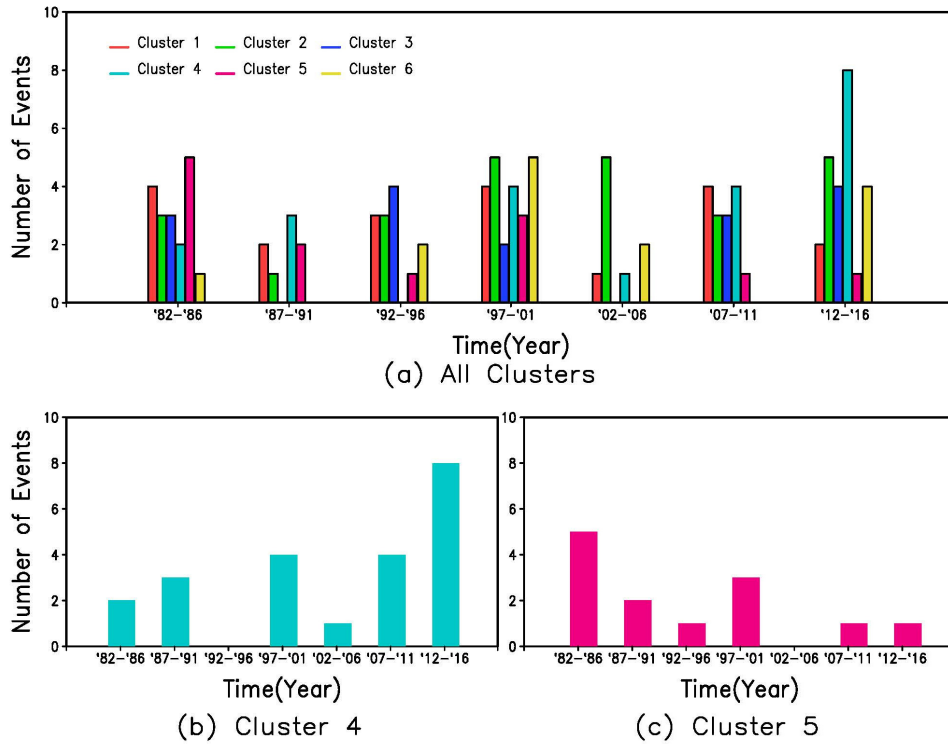


Fig. 9. 5-year trends of heat wave event frequencies for (a) six clusters, (b) Cluster 4, and (c) Cluster 5.

저기압 세력이, 군집 3은 고기압 세력이 상대적으로 강하다. 군집 2의 고기압성 순환은 그 중심이 일본 남부에 위치하여 남풍의 바람 편차를 일으키고, 군집 3은 중심이 일본 북부에 위치하여 남동풍 계열의 바람 편차를 보인다 (Fig. 4b-c). 결과적으로 군집 2는 남쪽의 따뜻한 공기가 유입되면서 전 시간에 걸쳐서 기온과 상대습도가 높게 나타나는 반면, 군집 3은 기온의 일교차가 상대적으로 크고 일 최저 상대습도가 낮게 나타났다 (Fig. 7b, 8).

군집 4는 준 정체성 고기압의 영향을 받은 유형으로, 음의 해면기압 편차가 나타난다. 이 편차와 주변의 기압계를 비교하면 상대적으로 높은 해면기압을 가지는 고기압이 한반도 상에 위치하여 유발된 폭염 패턴이다 (Fig. 4d). 군집 4의 폭염발생횟수는 뚜렷한 증가 추세의 경향성을 보였다 (Fig. 9b).

군집 5와 군집 6은 동풍에 의한 편 현상과 관련된 폭염 유형이다. 비슷한 발생기작을 보이지만, 군집 5는 한반도 남쪽에 강한 음의 해면기압 편차를, 군집 6은 한반도 북쪽의 넓은 영역에서 강한 양의 해면기압 편차를 보인다. 이처럼 한반도 북쪽의 고기압성 회전과 한반도 남쪽의 저기압성 회전에서 형성된 동풍이 태백산맥을 지나면서 서울에 고온건조한 공기를 유입시킨다 (Fig. 4e-f). 그 결과, 서울 일 기온 변동은 다른

유형에 비해 낮은 최저기온을 기록한 뒤 기온이 빠른 속도로 상승하여 일교차가 크게 나타났고, 일 최저 상대습도가 다른 유형들에 비해 가장 낮게 나타났다. 폭염발생일수의 변화를 살펴볼 때, 군집 5는 그 경향성이 감소하는 반면 군집 6은 별 다른 경향성이 나타나지 않았다.

본 연구를 통해 서울 폭염 발생에 대하여, SOM 기반 군집 분석을 통해 종관규모 폭염 발생기작을 이해할 수 있었다. 하지만 이는 서울 지역이라는 단일 지점에 대해 폭염의 유형을 분류한 것이라는 한계가 있어, 향후 한반도 전체 영역에 대한 분석이 필요하다. 폭염의 기준도 기상청 경보 기준을 고려하고, 폭염 발생 사례 전체에 대한 사례 설정과 SOM 군집분석을 위해 폭염 발생에 상응하는 대기변수를 해면기압 편차로 설정하였는데 보다 개선된 군집분석을 위하여 다변수 SOM 군집분석을 적용할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 개선된 한반도 폭염발생구조 분석을 기반으로 기후변화에 대응하는, 보다 더 체계적이고 정확한 한반도 폭염 메커니즘 이해의 향상을 통해 폭염에 대한 진단과 폭염 예측 가이던스 향상에 기여할 것으로 사료된다.

사 사

이 성과는 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2018R1A5A1024958).

REFERENCES

- Anderson BG, Bell ML. 2009. Weather-related mortality: How heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States. *Epid* 20: 205-213.
- Baldi M, Dalu G, Maracchi G, Pasqui M, Cesarone F. 2006. Heat waves in the Mediterranean: A local feature or a larger-scale effect? *Int J Climatol* 26: 1477-1487.
- Barry RG, Carleton AM. 2001. *Synoptic and dynamic climatology*. New York; Routledge
- Byun HR, Hwang HS, Go HY. 2006. Characteristics and synoptic causes on the abnormal heat occurred at Miryang in 2004. *Atmos* 16: 187-201 (in Korean with English abstract).
- Chattopadhyay R, Sahai AK, Goswami BN. 2008. Objective identification of nonlinear convectively coupled phases of monsoon intraseasonal oscillation: Implications for prediction. *J Atmos Sci* 65: 1549-1569.
- Cho H-O, Son SW, Park D-SR. 2018. Springtime extra-tropical cyclones in Northeast Asia and their impacts on long-term precipitation trends. *Int J Climatol* : 4043-4050.
- Choi B-C, Kim J, Lee DG, Kysely J. 2007. Long-term trends of daily maximum and minimum temperatures for the major cities of South Korea and their implications on human health. *Atmos* 17: 171-183 (in Korean with English abstract).
- Chu J-E, Ha K-J. 2011. Classification of intraseasonal oscillation in precipitation using Self-Organizing Map for the East Asian Summer Monsoon. *Atmos* 21: 221-228 (in Korean with English abstract).
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen L, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N, Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q J Roy Meteor Soc* 137: 553-597.
- DeGaetano AT, Allen RJ. 2002. Trends in twentieth-century temperature extremes across the United States. *J Clim* 15: 3188-3205.
- Fink AH, Brücher T, Krüger A, Leckebusch GC, Pinto JG, Ulbrich U. 2004. The 2003 European summer heatwaves and drought - synoptic diagnosis and impacts. *Weather* 59: 209-216.
- Garcia-Herrera R, Diaz J, Trigo RM, Luterbacher J, Fischer EM. 2010. A review of the European Summer heat wave of 2003. *Crit Rev Environ Sci Tech* 40: 267-306.
- Ha K-J, Ha E-H, Yoo C-S, Jeon E-H. 2004. Temperature trends and extreme climate since 1909 at big four cities of Korea. *Asia-Pac J Atmos Sci* 40: 1-16 (in Korean with English abstract).
- Hajat S, Kovats RS, Atkinson RW, Haines A. 2002. Impact of hot temperatures on death in London: A time series approach. *J Epid Commu Heal* 56: 357-372.
- Hulme M, Zhao Z-C, Jiang T. 1994. Recent and future climate change in East Asia. *Inter J Climatol* 14: 637-658.
- IPCC. 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Johnson NC, Feldstein SB, Tremblay B. 2008. The continuum of Northern Hemisphere teleconnection patterns and a description of the NAO shift with the use of Self-Organizing Maps. *J Clim* 21: 6354-6371.
- Jun S, Choi Y. 2013. The applicability of the Self-organizing Map method for synoptic climatology studies over the Republic of Korea. *J Clim Res* 8: 1-11 (in Korean with English abstract).
- Kim E-B, Park J-K, Jung W-S. 2014. A study on the occurrence characteristics of tropical night day and extreme heat day in the metropolitan city, Korea. *J Envir Sci Inter* 23: 873-885 (in Korean with English abstract).

- abstract).
- Kim H-G, Min K-D, Yoon IH, Moon Y-S, Lee D-I. 1998. Characteristics of the extraordinary high temperature events occurred in Summers of 1987 and 1994 over the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J Atmos Sci* 34: 47-64 (in Korean with English abstract).
- Kim J, Lee S. 2007. The distribution of heat waves and its cause in South Korea. *J Kor Geograp Soc* 42: 332-343 (in Korean with English abstract).
- Kim J-A, Kim KR, Lee CC, Sheridan SC, Kalkstein LS, Kim B-J. 2016. Analysis of occurrence distribution and synoptic pattern of future heat waves in Korea. *J Clim Res* 11: 15-27 (in Korean with English abstract).
- Kim Y-S, Hong S-K. 1996. A study of quasi-Foehn in the Youngdong-district in late Spring of early Summer. *Asia-Pac. J Atmos Sci* 32: 593-600 (in Korean with English abstract).
- Klinenberg E. 1999. Denaturalizing disaster: A social autopsy of the 1995 Chicago heat wave. *Theory and Society* 28: 239-295.
- Knowlton K, Rotkin-Ellman M, King G, Margolis HG, Smith D, Solomon G, Trent R, English P. 2009. The 2006 California heat wave: Impacts on hospitalization and emergency department visits. *Envir Heal Persp* 117: 61-67.
- Kysely J, Kim J. 2009. Mortality during heat waves in South Korea, 1991 to 2005: How exceptional was the 1994 heat wave? *Clim Res* 38: 105-116.
- Lee D-K, Park J-G. 1999. Regionalization of summer rainfall in South Korea using cluster analysis. *Asia-Pac J Atmos Sci* 35: 511-518 (in Korean with English abstract).
- Lee H-Y. 1994. The Nopsae, A Foehn type wind over the Young Suh region of Central Korea. *J Kor Geograp Soc* 29: 266-280.
- Lee M-I, Kang I-S. 1997. Temperature variability and warming trend in Korea associated with global warming. *Asia-Pac J Atmos Sci* 33: 429-443 (in Korean with English abstract).
- Liu Y, Weisberg RH. 2005. Sea surface temperature patterns on the West Florida shelf using growing hierarchical Self-Organizing Maps. *J Atmos Ocean Tech* 23: 325-338.
- Meehl GA, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Sci* 305: 994-997.
- Moon Y-S. 1990. Division of precipitation regions in Korea through the cluster analysis. *Asia-Pac J Atmos Sci* 26: 203-215 (in Korean with English abstract).
- Park J-K, Jung W-S, Kim E-B. 2008. A study on development of the extreme heat standard in Korea. *J Envir Sci* 17: 657-669 (in Korean with English abstract).
- Robine J-M, Cheung SLK, Roy SL, Oyen HV, Griffiths C, Micheal J-P, Herrmann FR. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comp Rend Biolo* 331: 171-178.
- Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA, Appenzeller C. 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332-336.
- Semenza JC, Rubin CH, Falter KH, Selanikio JD, Flanders WD, Howe HL, Wilhelm JL. 1996. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *The New Eng J Medic* 335: 84-90.
- Um I-H. 2003. A statistical study of Kohonen's Self-Organizing Map (SOM) [dissertation]. Korea University (in Korean with English abstract).